УДК 661.87:519

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРИФУЖНЫХ КАСКАДАХ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

С.В. Филимонов, Г.М. Скорынин, А.А. Орлов*, Д.Н. Голдобин

ФГУП «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск
*Томский политехнический университет
E-mail: orlov@phtd.tpu.edu.ru

Разработана и реализована математическая модель нестационарных разделительных процессов обогащения урана в промышленных центробежных каскадах, которая может быть использована в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства и применения в качестве экспертной системы в автоматизированной системе управления технологической схемой.

Введение

Известно, что в общем случае нестационарные процессы в разделительном каскаде описываются нелинейным уравнением второго порядка в частных производных (относительно времени и номера ступени) параболического типа с переменными коэффициентами, аналитические решения которого построены лишь для ограниченного числа задач [1]. Значительно более перспективными методами исследования нестационарных процессов, являются методы численного решения уравнений описывающих эти процессы. Вопросам численного исследования нестационарных процессов в разделительных каскадах посвящено много работ, например, [2]. Однако используемые в этих работах математические методы либо имеют ограниченную область практического применения, либо требуют больших временных затрат на численное решение, либо не учитывают особенностей построения технологических схем центрифужного производства. При этом в работах рассматривается простейший симметричный противоточный прямоугольно-секционный каскад [3], в котором секции ступеней работают в одинаковом гидравлическом режиме. Между тем, эффект обогащения центрифуги значительно выше (примерно в 100 раз), чем у диффузионных машин, а длина центрифужных каскадов существенно меньше. Как правило, ступени работают в отличающихся гидравлических режимах. В этих условиях повышается вклад каждой ступени в работу каскада, и соответственно при исследовании нестационарных процессов важно знать состояние каждой ступени.

В работе предложена математическая модель, описывающая практически все виды нестационарных процессов как в отдельной ступени, так и в каскадах произвольного построения, отличающихся от традиционных симметричных противоточных каскадов. К тому же, моделируется вся многокаскадная технологическая схема, представляющая собой совокупность каскадов вместе со связывающими их линиями межкаскадных коммуникаций (МКК).

Модель является дополнением к ранее разработанной математической модели нестационарных гидравлических процессов в многокаскадной технологической схеме (ТС) центрифужного завода [4, 5].

1. Описание математической модели нестационарных разделительных процессов

Рассмотрена многокаскадная ТС разделительного завода, состоящая из K-каскадов (рис. 1). Каждый каскад m ($1 \le m \le K$) состоит из   ступеней с нумерацией от отвала к отбору.

Схема соединения ступеней в каскаде может быть произвольной, например, так называемой параллельно-последовательной (рис. 2).

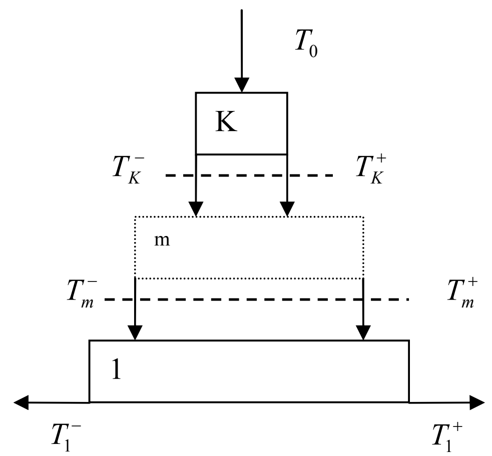


Рис.1. *Многокаскадная ТС*

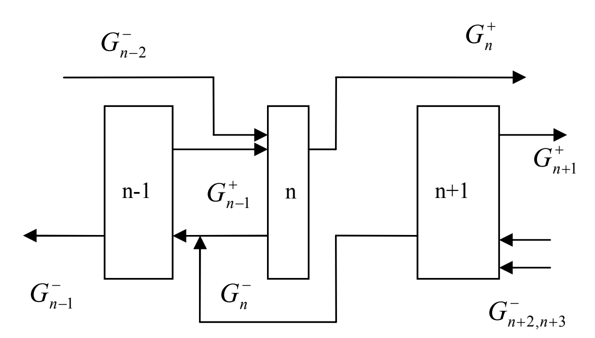


Рис. 2. *Параллельно-последовательная схема соединения ступеней в каскаде*

Ступень с номером n состоит из S_{nm} параллельно соединенных секций; секция i_{nm} ($1 \le i_{nm} \le S_{nm}$) состоит из J_{inm} параллельно соединенных газовых центрифуг. Газовые центрифуги в секции считаются идентичными, секции могут быть различными (разное число

ГЦ, разные геометрические размеры коммуникаций и т.д.). Конструктивные параметры K (порядка 4...12), N_m (порядка 4...25) определяются номенклатурой выпускаемой продукцией, изменением комплектации и технологических характеристик ГЦ.

В предложенной работе рассмотрена однообъемная модель разделительной ступени. Каждая ступень каскадов многокаскадной технологической схемы центрифужного производства считается заполненной бинарной смесью с одинаковой концентрацией изотопа ^{235}U, равной его концентрации в коллекторе питания этой ступени. Газосодержание разделительной ступени считается равным сумме газосодержаний всех объемов, входящих в состав ступени и учитываемых при расчете нестационарной гидравлики ТС [4]. На выходе из ступени (в коллекторах отбора и отвала) концентрации, определяемые разделительными свойствами ступени, соответственно выше и ниже концентрации питания.

Основным уравнением нестационарного процесса разделения является уравнение баланса обогащаемого компонента питающей смеси в ступени n каскада m многокаскадной ТС:

$$\frac{d(M_{nm}C_{0nm})}{dt} = T_{0n}(t)K_{0n}(t) + \sum_{k=1}^{K}\delta_{Rkn}T_{Rkn}K_{Rkn} + \sum_{k=1}^{K}\delta_{Wkn}T_{Wkn}K_{Wkn} + \sum_{p=n+1}^{N}\delta_{nTp}G_{Tp}C_{Tp} + \sum_{w=1}^{n-1}\delta_{nPw}G_{Pw}C_{Pw} + \delta_{OP}C_{Закр,m}(G_{ЛNm} - T_{0Pm}(t)) - \sum_{i=1}^{S}L_{01inm}C_{0nm}, \quad (1)$$

где K – количество каскадов ТС; S – количество технологических секций в ступени n каскада m; M_{nm} – газосодержание ступени n каскада m; C_{0nm} – концентрация питающей смеси ступени n каскада m; $T_{0n}(t)$, $K_{0n}(t)$ – расход и концентрация внешнего потока питания; δ_{Rkn} – признак связи потока отбора T_{Rkn} с концентрацией K_{Rkn} каскада k с питанием ступени n ($k \neq m$) каскада m ($k \neq m$); δ_{Wkn} – признак связи потока отвала T_{Wkn} с концентрацией K_{Wkn} каскада k с питанием ступени n ($k \neq m$) каскада m ($k \neq m$); δ_{nTp} – признак связи потока отвала G_{Tp} с концентрацией C_{Tp} ступени n каскада m с питанием ступени n каскада m; δ_{nPw} – признак связи потока отбора G_{Pw} с концентрацией C_{Pw} ступени w каскада m с питанием ступени n каскада m; δ_{OP} – признак отборной ступени (0 или 1); $G_{ЛNm}$, T_{OPm} – соответственно потоки отбора отборной ступени N_m (m=1...K) и каскада m; $C_{Закр,m}$ – концентрация потока закрутки каскада m; L_{01inm} – поток питания секции i ступени n каскада m.

В общем случае входящие в ур. (1) величины газосодержаний ступеней, потоков питания каскадов (внешних относительно ТС и межкаскадных потоков, являющихся потоками отбора и отвала других каскадов, а также межступенных потоков) являются функциями времени. Эти функции могут быть получены решением гидродинамических уравнений, которые рассмотрены в работах [4, 5].

Концентрации межкаскадных потоков питания K_{Rkn} и K_{Wkn} определяются через соответствующие концентрации потоков отбора и отвала каскадов с учетом транспортной задержки τ_{zad} под которой понимается время прохождения гидравлического возмущения по соответствующим линиям МКК. Время τ_{zad} определяется из решения уравнений неразрывности для установившегося одномерного потока, изолированного от внешней среды [6], относительно неизвестной скорости протекания газа υ_i по i-ому участку линии МКК:

$$G = S_i \rho_i \upsilon_i,$$

где G – расчетная величина потока в линии МКК (одинаковая для всех участков линии МКК), г/с; S_i – площадь сечения i-го участка линии МКК, см^2; $\rho_i = \frac{\mu P_i 1333}{R_г T_i}$ – плотность газа в i-ом участке линии МКК, г/см^3; μ – молярная масса газа, г/моль; P_i – расчетная величина давления газа в i-ом участке линии МКК, мм рт.ст.; $R_г$ – универсальная газовая постоянная, эрг/(мольК); T_i – температура газа, К; υ_i – скорость газа в i-ом участке линии МКК, см/сек.

Величины давлений в i-х участках линии МКК определяются из принятого турбулентного характера протекания газа, известного из решения гидравлической задачи значения какого-либо давления (например, давления в коллекторе питания отборной ступени) и заданных значений геометрических размеров этих участков.

Отборные ступени каскадов имеют некоторые особенности, связанные с тем, что часть потоков отбора через регуляторы закрутки поступает обратно в качестве питания этих ступеней. Кроме того, на части каскадов закруточный поток подается после прохождения очистительного каскада (ОК). Следовательно, концентрация закруточного потока $C_{Закр,m}$ изменяется с некоторой транспортной задержкой по отношению к концентрации потока отбора отборной ступени. Время транспортной задержки также определяется в задаче нестационарной гидравлики [4, 5].

Ур. (1) составляется для каждой ступени каскадов многокаскадной ТС. Полученная система уравнений состоит из KN_m-дифференциальных уравнений с 3 KN_m неизвестными, каковыми являются концентрации ступенных потоков питания, отбора и отвала (C_{0nm}, C_{Pnm}, C_{Tnm}). Для понижения размерности системы воспользуемся уравнением сохранения легкой компоненты и соотношением, определяющим полный коэффициент разделения ступени χ_{nm}.

$$C_{0nm} = \theta_{nm}C_{Pnm} + (\theta_{nm} - 1)C_{Tnm}, \quad (2)$$

где θ_{nm} – коэффициент деления потоков ($\theta_{nm} = \frac{G_{Pnm}}{G_{0nm}}$).

$$\chi_{nm} = \frac{C_{Pnm}(1 - C_{Tnm})}{C_{Tnm}(1 - C_{Pnm})}. \quad (3)$$

Из ур. (2) и (3) можно определить C_{Tnm}:

$$C_{Tnm} = \frac{C_{Pnm}}{\chi_{nm} - C_{Pnm}(\chi_{nm} - 1)}. \qquad (4)$$

Путем подстановки выражений для C_{Tnm} и C_{0nm} система ур. (1) сводится к системе дифференциальных уравнений относительно KN_m неизвестных C_{Pnm} как функций времени. Решение этой системы уравнений при заданных начальных значениях C_{Pnm} моделирует нестационарные разделительные процессы в каскадах ТС.

2. Алгоритм решения уравнений нестационарного разделения

Обозначив правую часть ур. (1) после подстановки в него выражений (2) и (4) через $\psi_{nm}(t)$ получим:

$$\frac{d[M_{nm}(\theta_{nm}C_{Pnm} - (1-\theta_{nm})f_{Ct}(C_{Pnm}))]}{dt} = \Psi_{nm}(t), \quad (5)$$

где $f_{Ct}(C_{Pnm})$ – функция от концентрации отбора ступени n каскада m, определяемая выражением (4).

Система уравнений (5) представляет собой задачу Коши с заданными начальными условиями. Задача Коши за редким исключением не имеет аналитических методов решения. В численном методе вместо отыскания непрерывных функций времени рассчитываются значения искомых функций в дискретные моменты времени, а система дифференциальных уравнений заменяется тем или иным способом разностными уравнениями. В применяемом алгоритме, аналогично гидравлической задаче [4, 5], используется неявная схема Эйлера с пересчетом [7], которая обладает третьим порядком точности на шаге и вторым на интервале. В соответствии с ней, имеем:

$$M_{nm}^{(K+1)}(\theta_{nm}^{(k+1)}C_{Pnm}^{(k+1)} - (1-\theta_{nm}^{(k+1)})f_{Ct}^{(k+1)}(C_{Pnm}^{(k+1)})) -$$
$$M_{nm}^{(k)}(\theta_{nm}^{(k)}C_{Pnm}^{(k)} - (1-\theta_{nm}^{(k)})f_{Ct}^{(k)}(C_{Pnm}^{(k)})) =$$
$$= \frac{\Delta t}{2}(\Psi_{nm}^{(k+1)} + \Psi_{nm}^{(k)}). \qquad (6)$$

Написав уравнения (6) для всех ступеней каскадов ТС, получим систему алгебраических нелинейных уравнений относительно $C_{Pnm}^{(K+1)}$. Нелинейность обусловлена наличием членов, содержащих выражение $f_{Ct}^{(K+1)}C_{Pnm}^{(K+1)}$. На каждом временном шаге проводится линеаризация её нелинейных членов. В предложенном алгоритме она заключается в замене функции $f_{Ct}^{(K+1)}C_{Pnm}^{(K+1)}$ уравнением касательной в точке C_{0Pnm}.

$$C_{Tnm}^{(K+1)} = a_{Tnm}^{(k)} + b_{Tnm}^{(k)}C_{Pnm}^{(k+1)}. \qquad (7)$$

Коэффициенты $a_{Tnm}^{(K)}$ и $b_{Tnm}^{(K)}$ вычисляются из условия равенства линейных (7) и нелинейных (4) выражений, а также их производных в некоторой точке C_{0Pnm}.

$$\frac{C_{0Pnm}}{\chi_{nm} - C_{0Pnm}(\chi_{nm}-1)} = a_{Tnm} + b_{Tnm}C_{0Pnm}, \qquad (8)$$

$$(C_{Tnm})' = \frac{\chi_{nm}}{[\chi_{nm} - C_{0Pnm}(\chi_{nm}-1)]^2} = b_{Tnm}. \qquad (9)$$

Из решения ур. (8, 9) получаем:

$$a_{Tnm}^{(k)} = -\frac{(C_{Pnm}^{(K)})^2(\chi_{nm}^{(K)}-1)}{[\chi_{nm}^{(K)} - C_{Pnm}^{(K)}(\chi_{nm}^{(K)}-1)]^2},$$

$$b_{Tnm}^{(k)} = \frac{\chi_{nm}^{(K)}}{[\chi_{nm}^{(K)} - C_{Pnm}^{(K)}(\chi_{nm}^{(K)}-1)]^2}.$$

После линеаризации получим систему линейных уравнений относительно неизвестных $C_{Pnm}^{(K+1)}$, являющихся приближением к величинам $C_{Pnm}(t+\Delta t)$. Система решается методом исключения Гаусса [7, 8]. В качестве начальных условий, исходные значения $C_{Pnm}^{(0)}=C_{Pnm}(t=0)$, принимаются расчетные данные исходного стационарного режима исследуемой ТС.

Значения коэффициентов полного разделения χ_{nm} ступеней определяются разделительными свойствами ступеней. Разделительные свойства отдельной центрифуги (ГЦ) описываются эмпирической зависимостью, определяемой в результате математической обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях оборудования данного типа ГЦ.

$$\chi_{nm} = \chi_{nm}(g, \theta), \qquad (10)$$

где g, θ – расход питания и коэффициент деления потоков отдельной ГЦ.

Считая величину χ инвариантом, независящим от концентрации потоков питания ступеней, можно связать величины C_{Tnm} и C_{Pnm} по формуле (4) при работе ступеней в области концентраций, отличающихся от концентрации природного сырья.

Разделительная характеристика $\chi_{nm}(g,\theta)$ определяется при работе ГЦ в стационарном режиме, когда выполняется баланс вещества и легкой компоненты. Использование этой характеристики в нестационарном процессе объясняется тем, что процессы установления равновесия в отдельной ГЦ протекают значительно быстрее, чем в каскадах ТС. Центрифуга рассматривается как работающая в стационарном режиме, который медленно изменяется.

По описанной модели в среде Borland Delphi 5.0 реализован программный комплекс и проведены расчеты для следующих случаев нестационарных возмущений ТС: изменение потоков отбора и питания; перенос точек подачи питания; закрытие ступеней и секций каскадов; изменение частоты питающего тока ГЦ; изменение загрузки оборудования; изменение концентрации внешних потоков питания. В качестве разделительной использовалась приближенная модельная характеристика, отличающаяся от фактической, но отражающая основные тенденции протекания реального процесса.

В качестве примера, приведем результаты численного расчета нестационарных процессов разделения, возникающих при закрытии отдельных ступеней девятиступенного каскада (рис. 3).

Сравнительный анализ пар кривых 1, 2 и 3, 4 позволяет сделать вывод, что созданная модель адекватно описывает поведение реального объекта.

Повышение со временем обогащения отбора каскада (1, 2) объясняется тем, что с момента закрытия ступени каскад переходит в гидравлический режим с повышенной нагрузкой на оставшиеся ступени, при котором величина χ имеет большее значение. Ломаный характер кривых 2, 4 объясняется способом измерения концентрации ^{235}U, основанным на регистрации γ-излучения рабочей газовой смеси, интенсивность которого носит вероятностный характер.

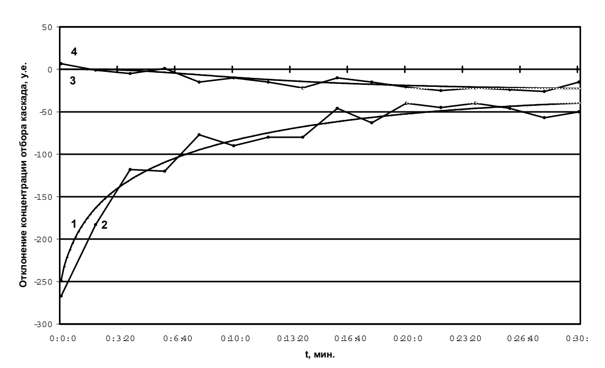


Рис. 3. *Временные зависимости отклонений концентрации отбора каскада относительно исходной в условных единицах (1 у.е.=0,001 %). Закрытие ступеней: 1) расчет; 2) факт – отборной и 3) расчет; 4) факт – предотвальной*

Из рисунка также следует, что влияние отборной ступени на конечный продукт значительно выше влияния отвальных ступеней.

Проведенные расчеты показали, что характеристики быстродействия модели позволяют оперативно производить расчеты многокаскадной технологической схемы в режиме реального времени. Так, например, время счета 4-х часового временного интервала протекания нестационарного процесса для четырехкаскадной ТС с общим количеством ступеней порядка 50 и временным шагом, равным 1 с, составляет примерно 140 с. В связи с этим разработанная модель нашла применение в АСУТС в качестве экспертной системы. Кроме того, разработанная модель используется в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства [9, 10].

Заключение

Предложена математическая модель нестационарных разделительных процессов в промышленных центрифужных каскадах, учитывающая отличительные особенности построения исследуемой технологической схемы разделительных производств, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями. Разработан алгоритм решения уравнений, описывающих нестационарные процессы в центрифужных каскадах.

Реализованная модель позволяет получать решения в режиме реального времени при произвольном наборе возмущающих воздействий и исследовать нестационарные процессы, возникающие при изменении величин внешних потоков, их отключений; изменении частоты и отключении питающего тока; изменении точки подачи питания; отказах и перенастройке межступенных регуляторов; отключении части оборудования; нарушениях в работе оборудования линий МКК; при различных сочетаниях этих воздействий.

Модель внедрена и используется в АСУТС разделительного производства ФГУП ПО "Электрохимический завод" в качестве экспертной системы, а также в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large – Scale Production of U-235 // National Nuclear Energy Series. – 1951. – V. 1B. – Div. 3. – 156 p.
2. Лагунцов Н.И., Левин Е.В., Сулаберидзе Г.А. К расчету на ЭВМ нестационарных процессов в многоступенчатых каскадах для разделения двухкомпонентных изотопных смесей // Инженерно-физический журнал. – 1976. – № 3. – Т. 31. – С. 507–513.
3. Обогащение урана / Под ред. С. Виллани. Пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Голдобин Д.Н. Моделирование нестационарных процессов в АСУТС промышленного обогащения урана // Известия вузов. Физика. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 173–178.
5. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Орлов А.А., Голдобин Г.Д. Моделирование нестационарных гидравлических процессов в промышленных центрифужных каскадах обогащения урана // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 85–88.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
7. Пирумов У.Г. Численные методы. – М.: Дрофа, 2003. – 221 с.
8. Бахвалов Н.С. и др. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.
9. Власов В.А., Шубин А.Н., Филимонов С.В., Орлов А.А., Голдобин Д.Н., Колпаков Г.А. и др. Компьютерный тренажер для оперативного технологического персонала производства по разделению изотопов урана центробежным методом // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 176–181.
10. Пат. 2250509 РФ. МПК[6] G09B 9/00. Тренажер операторов системы управления технологическим процессом разделения изотопов урана центробежным методом в штатных и аварийных ситуациях / В.А. Власов, А.А. Орлов, А.Н. Шубин, С.В. Филимонов, Г.А. Колпаков. Опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11.